

การสังเคราะห์ตัวเร่งชนิดใหม่ K-OMS-2 ใช้ในกระบวนการเสมือนเฟนต์ัน
ในการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120
SYNTHESIS OF NOVEL K-OMS-2 CATALYST USED IN FENTON-LIKE PROCESS
TO DEGRADE REACTIVE RED 120 DYE

จันทร์ทิพย์ ผลาเลิศ¹, สุทธิพงษ์ วรณไพบุลย์² และ กิติโรจน์ หวันตาหลา^{1, 3, *}
Janthip Palalerd¹ Suttipong Wannapaiboon² Kitirote Wantala^{1, 3, *}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

³ ศูนย์การจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์
ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) อาคารวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

¹ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

² Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)

³ Research Center for Environment and Hazardous Substance Management (EHSM),
Khon Kaen University, and Center of Excellence on Hazardous Substance Management (HSM),
Chulalongkorn University

Received: 26 February 2020 Revised: 20 June 2020 Accepted: 10 June 2020

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแมงกานีสออกไซด์ออกตระฮีดรอลโมเลกุลาร์ซีฟ (Manganese-based octahedral molecular sieves, OMS-2) โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยไม่ผ่านการแคลไซน์ และทดสอบการย่อยสีแดง เบอร์ 120 ร่วมกับเปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต (Peroxymonosulfate, PMS) ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120 ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ออกซีโมโนซัลเฟตโดยออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นกัน (Box-behnken design, BBD) ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างของตัวเร่ง

* ผู้ประสานงาน: กิติโรจน์ หวันตาหลา

อีเมล: kitirote@kku.ac.th

ปฏิกิริยามีลักษณะเป็นผลึกที่สามารถยืนยันได้ว่าเป็น K-OMS-2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 70.35 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมรีคล้ายรูปไข่มีขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร สถานะออกซิเดชันของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Mn^{3+} และ Mn^{4+} ที่มีอัตราส่วนมวลเท่ากับ 0.28 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120 พบว่าปัจจัยทั้งสามมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ พีเอช 6.67 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.78 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ออกซิโมโนซัลเฟต 4.53 มิลลิโมลาร์ (mM) ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 2 นาที พบว่าสามารถย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120 ประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ ผลงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 สามารถทำปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้นได้ในสภาวะพีเอชที่เป็นกลาง

คำสำคัญ: OMS-2, เปอร์ออกซิโมโนซัลเฟต, สีย้อม, ปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้น

ABSTRACT

The aims of this research were to synthesize manganese-based octahedral molecular sieves (K-OMS-2) prepared by the hydrothermal method without calcination process and to investigate the degradation performance of reactive red 120 (RR120) dye on Fenton-like reaction with peroxymonosulfate (PMS); study the performances of dye degradation with initial concentration about 50 mg/L; and study the factors affected K-OMS-2 performance, e.g., initial pH value, catalyst loading, initial concentration of peroxymonosulfate (PMS). The experiment was designed using Box-behnken design (BBD). The results sindicate that the crystalline phase of catalyst can be confirmed for K-OMS-2 material and the specific surface area was $70.35 \text{ m}^2/\text{g}$. The morphology of catalyst was obvious the aggregation of particles in oval shape with sizing about $1 \mu\text{m}$. The oxidation states of catalyst were showed in Mn^{3+} and Mn^{4+} with mass ratio at about 0.28. The results of degradation performance of reactive red 120 (RR120) dye reveal that the three effects were significant on degradation efficiency of dye. The optimal condition

was in pH 6.67, catalyst loading 1.78 g/L and initial PMS concentration 4.53 mM at reaction time 2 mins, in which the dye removal was about 98%. This research can be concluded that K-OMS-2 can be used for Fenton-like reaction in neutral pH condition.

Keywords: OMS-2, Peroxymonosulfate, dyes, Fenton-like reaction

บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทยเป็นอย่างยิ่ง มีบทบาทสำคัญในการนำเข้าเงินตราต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง (Kant et al., 2012) การใช้สีย้อมในกระบวนการผลิต ส่งผลให้เกิดของเสียที่มีส่วนผสมของสีย้อมและสีย้อมไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม (Doumic et al., 2013) ดังนั้นมีความจำเป็นต้องบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมปัจจุบันมีการใช้วิธีการต่าง ๆ ในการกำจัดสีย้อม เช่น กระบวนการดูดซับ (Gomathi et al., 2009) วิธีการทางชีวภาพ (Tehrani-Bagha et al., 2016) และปฏิกิริยาทางเคมี (Youssef et al., 2016) งานวิจัยของ Kumari และคณะ (Kumari et al., 2016) มีการศึกษากระบวนการดูดซับสำหรับกำจัดสีย้อมคองโกเรด (Congo red) ผลพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ แต่ข้อด้อยของกระบวนการดูดซับคือทำให้เกิดของเสียที่เป็นสารดูดซับตะกอนตัวดูดซับโคลน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดมลพิษหตุยภูมิ งานวิจัยใช้วิธีตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบเปียก (Catalytic wet oxidation) (Kondru et al., 2009) ในการย่อยสลายสีย้อมคองโกเรด (Congo red) ด้วยซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับเหล็ก ผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมสูงถึง 97 เปอร์เซ็นต์ แต่ข้อด้อยของปฏิกิริยานี้คือต้องทำที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง และอีกหนึ่งวิธีที่นิยมกันมากขึ้นในปัจจุบันคือ ปฏิกิริยาเฟนตันเป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation processes) เป็นการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) แต่อย่างไรก็ตามข้อด้อยของปฏิกิริยาเฟนตันคือ ทำปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำ หากพีเอชสูงกว่า 3 จะทำให้เกิดตะกอนของเหล็ก และทำให้เหล็กไม่สามารถใช้เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาเฟนตันได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการตกตะกอนของเหล็ก จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ แทน

เหล็กเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า กระบวนการเสมือนเฟนตัน แต่กระบวนการนี้ยังมีข้อด้อยคือถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous) ยังทำให้เกิดตะกอนหลังทำปฏิกิริยา ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาคือกระบวนการบำบัดที่เพิ่มเข้ามาหลังเสร็จสิ้นกระบวนการนั้นคือการใช้ตัวเร่งแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) ในกระบวนการเสมือนเฟนตัน (Fenton-like) ทำให้มีนักวิจัยหลายท่านสนใจศึกษาตัวเร่งแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) เช่น การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแมงกานีสไดออกไซด์ ($\alpha\text{-MnO}_2$) (Saputra et al., 2012) ที่มีการกระตุ้นร่วมกับเปอร์ออกซิโมโนซัลเฟต (Peroxymonosulfate, PMS) ในการสร้างซัลเฟตเรดิคัล (Sulfate radical) ย่อยสลายพินอล พบว่า $\alpha\text{-MnO}_2$ มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาขึ้นกับ โครงสร้างและสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา งานวิจัยของ Luo และคณะ (Luo et al., 2015) ใช้แมงกานีสออกไซด์ออกตรอะฮีดรอลโมเลกุลาร์ซีฟ (Manganese-based octahedral molecular sieves, OMS-2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ เปอร์ออกซิโมโนซัลเฟต (Peroxymonosulfate, PMS) เป็นตัวออกซิไดซ์ ในการกำจัดสารละลายสีย้อม ผลการวิจัยพบว่าที่ พีเอช 7.3 อัตราในการย่อยสลายสารละลายสีย้อมเท่ากับ 93 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 60 นาที ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแมงกานีสไดออกไซด์ (Mn_2O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดและมีความสัมพันธ์กับสถานะออกซิเดชัน โดยทั่วไปแล้วแมงกานีสออกไซด์ออกตรอะฮีดรอลโมเลกุลาร์ซีฟ หรือคิริโบโตมิเลน (K-OMS-2) เป็นรูปแบบส่วนใหญ่เป็นแมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese dioxide) ที่มีขนาด tunnel $0.46 \text{ nm} \times 0.46 \text{ nm}$ ซึ่งสร้างมาจากโครงสร้างหกเหลี่ยม (edge-shared double; MnO_6) ซึ่งแสดงคุณสมบัติเด่น เช่น มีความหลากหลายของออกซิเดชัน ($2+$ $3+$ และ $4+$) ไม่ชอบน้ำ วัสดุโครงสร้างที่มีรูพรุน และมีความสามารถในการปล่อยออกซิเจนง่ายในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีความเป็นกรด (Acidic sites) คือมีประจุลบบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Ye et al., 2019) ซึ่งปัจจุบันได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นด้านการเร่งปฏิกิริยา การแลกเปลี่ยนไอออนและการใช้งานในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานด้านพลังงานและด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้น K-OMS-2 ที่มีการเตรียมโดยง่ายด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยไม่ผ่านการแคลไซน์ จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสร้างเรดิคัล

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ของตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 ในการบำบัดสีแดง เบอร์ 120 ด้วยกระบวนการเสมือนเฟนตัน พร้อมทั้งศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ ลักษณะโครงสร้างผลึก รูปร่างสัณฐานวิทยา

ความเป็นรูปพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และเลขออกซิเดชันของแมงกานีสในตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณความเข้มข้นของ PMS โดยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นกัน (Box-Behn design, BBD) และศึกษาผลของปัจจัยหลัก (Main effect) และปัจจัยร่วมกัน (Interaction effect) อีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2

สารเคมีทั้งหมดที่ใช้สำหรับการศึกษานี้เป็นเกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ได้แก่ แมงกานีสอะซิเตท ($Mn(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$) มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ สีแดง เบอร์ 120 และ เปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต (Peroxymonosulfate, PMS) ซื้อจากบริษัท Sigma-aldrich, สหรัฐอเมริกา โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ของบริษัท Univar และ กรดอะซิติก glacial Grade AR, QREc (CH_3COOH) ของบริษัท QREc งานวิจัยนี้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 ตามวิธีเดียวกันกับงานวิจัยของ Yodsa-nga และคณะ (Yodsa-nga et al., 2015) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล เป็นวิธีที่เตรียมในสภาวะอุณหภูมิที่ต่ำโดยไม่ผ่านการแคลไซน์เพื่อป้องกันการเปลี่ยนโครงสร้างปฏิกิริยา K-OMS-2 ไปเป็นโครงสร้างแมงกานีสออกไซด์ออกตระฮีดรอลโมเลกุลาร์ซีฟชนิดอื่น (K-OMS-7) ขั้นตอนการเตรียมสามารถอธิบายได้โดยย่อดังนี้ เตรียมสารละลายแมงกานีสอะซิเตทเตตราไฮเดรต ($Mn(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$) และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ในน้ำกลั่นอย่างละ 40 มิลลิลิตร ปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นหยดสารละลายโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ลงในสารละลายแมงกานีสอะซิเตท ($Mn(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$) ช้าๆ ในขณะที่หยดทำการปั่นกวนจนสิ้นสุดการหยดสาร และทำการปั่นกวนสารละลายผสมต่ออีก 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการปรับค่าพีเอชของสารผสมโดยใช้กรดอะซิติก จนสารละลายมีค่าพีเอช ≤ 3.5 และปั่นกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่มีสีน้ำตาลเข้มเหลืองในภาชนะเทฟลอนในชุดอโต้เครปที่ทำจากสแตนเลส (Stainless autoclave) ทำการบ่มด้วยอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$) เป็นเวลา 21 ชั่วโมง สารที่ได้จะมีลักษณะเป็นของผสมระหว่างของแข็งและของเหลวสีน้ำตาลเข้ม หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกของเหลวและของแข็งออกจากกัน

ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 3500 รอบต่อนาที จนกระทั่งค่าความเป็นกรดลดลงจนน้ำล้างมีค่าพีเอชเป็นกลาง และนำไปไล่ความชื้นด้วยเครื่องคอนเซนเทรเตอร์ (Concentrator) ที่ 60 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สุดท้ายนำของแข็งที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2. วิเคราะห์คุณลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา OMS-2

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, PANalytical, EMPYREAN, Netherlands) วัดองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จาก 20 ถึง 80 องศา ที่แรงดันไฟฟ้า 45 กิโลโวลต์ (kV) กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ (mA) และศึกษารูปร่างสัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope, FE-SEM) คำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยการศึกษาการดูดซับและการคายซับของก๊าซไนโตรเจน (N_2 -Adsorption Desorption, ASPS2460, Micrometrics, USA) โดยใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) โดยใช้ข้อมูล 10 จุด ตรวจสอบสถานะเลขออกซิเดชันของแมงกานีสในตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ บริเวณใกล้ขอบการดูดกลืนรังสีของอะตอม (X-ray adsorption near edge structure, XANES) และ เทคนิคสเปกโทรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) ณ สถานีลำแสงที่ 1.1 และ 5.3 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ประเทศไทย

3. การย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120

เตรียมสารละลายสีแดง เบอร์ 120 ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร หลังจากนั้นปรับพีเอช โดยใช้ 0.1 โมลาร์ ของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และนำตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณความเข้มข้นของ PMS ตามชุดทดลองของการออกแบบการทดลอง ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 2 5 10 15 20 30 45 60 นาที ตามลำดับ โดยนำตัวอย่างที่เก็บผ่านการกรองด้วยตัวกรองชนิดไนลอน ที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร นำตัวอย่างที่ผ่านตัวกรองไปวิเคราะห์หาปริมาณ สีที่ยอมที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectroscopy, Specord 200 plus, analytik jena, Germany) ที่ความยาวคลื่น 300-700 นาโนเมตร

และคำนวณปริมาณความเข้มข้นโดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน การคำนวณค่าหาร้อยละการย่อยสลายสีย้อม โดยใช้สมการที่ 1

$$Y = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ Y คือ ค่าร้อยละของการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีแดง เบอร์ 120

C_t คือ ความเข้มข้นที่เหลือในเวลาต่างๆ ของการทำปฏิกิริยา

ทำการทดลองตามที่ออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นกิน (Box-Behn design, BBD) ซึ่งมี 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ แสดงรายละเอียดได้ในตารางที่ 1 และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ในสมการควอดราติก (Quadratic equation) แสดงในสมการที่ 2 โดยใช้โปรแกรม MiniTab (version 18)

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นกิน (Box-Behn design, BBD)

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
ค่าพีเอชเริ่มต้น, X_1	4	7	10
ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา, X_2 (กรัม, g)	0.2	0.6	1
ความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ออกซิโมโนซัลเฟต, X_3 (มิลลิโมลาร์, mM)	3.536	4.418	5.300

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_i^2 X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j \neq i}^3 \beta_{ij} X_i X_j + \text{error} \quad (2)$$

โดยที่ Y คือ ค่าร้อยละประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อม

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

X คือ ตัวแปรอิสระที่เป็นค่ารหัส (Coded value)

X_1 คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยา

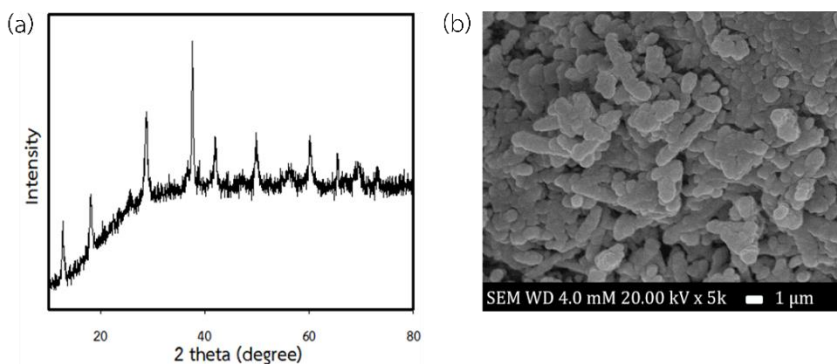
X_2 คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)

X_3 คือ ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของ PMS (มิลลิโมลาร์) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

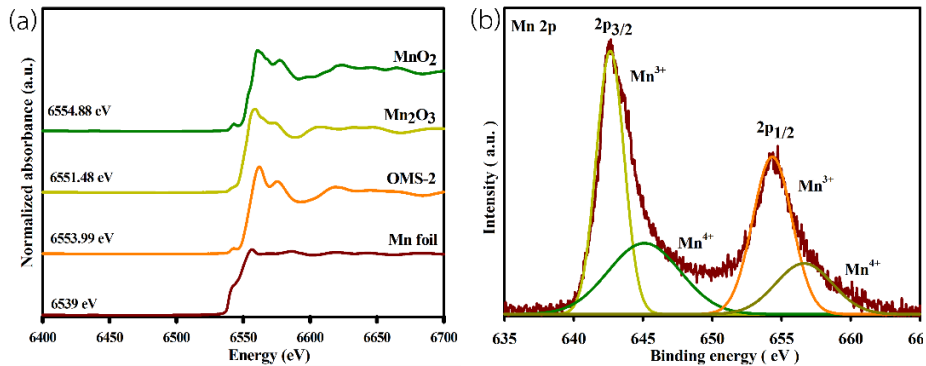
1. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 1 (a) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีโครงสร้าง คริปโตไมเลน ซึ่งสามารถยืนยันได้จากพีคที่ตำแหน่ง $2\theta \approx 12.8^\circ$ 18.5° 28.9° 37.5° 42° 50° และ 60° (JCPDS 29-1020) ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัย Yodsa-nga และคณะ (Yodsa-nga et al., 2015)



รูปที่ 1 (a) รูปแบบสเปกตรัม XRD, (b) ภาพถ่าย FE-SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2

ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่อง FE-SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงในรูป (b) เห็นได้ว่าลักษณะของอนุภาคที่เกาะบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นทรงกลมรีคล้ายรูปไข่ที่มีขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตรและมีการเกาะรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ หากขยายแล้วพบว่าลักษณะคล้ายเส้นใยที่เกาะสานกันเป็นอนุภาคคล้ายรังนก (Nest-like) ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูงเท่ากับ 70.35 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Yodsa-nga และคณะ (Yodsa-nga et al., 2015) แต่เมื่อเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของอนุภาคแตกต่างจากงานวิจัยดังกล่าว เกิดจากขนาดของกำลังขยายในการถ่ายภาพที่ต่างกัน แต่การเตรียมโดยใช้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์เดียวกัน และวิธีการสังเคราะห์วิธีเดียวกัน ควรได้โครงสร้างลักษณะของอนุภาคแบบเดียวกันยืนยันด้วยพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการหาเลขออกซิเดชันและชนิดของแมงกานีสของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XANES และ XPS แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 (a) สเปกตรัม XANES ของสารมาตรฐานและตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2
(b) สเปกตรัม XPS ของตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2

ผลการศึกษาวิเคราะห์ XANES ตามรูปที่ 2 (a) ใช้ในการวิเคราะห์ออกซิเดชันและชนิดของแมงกานีสของตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 เปรียบเทียบกับลักษณะของสารตัวอย่างอ้างอิง ตำแหน่งพลังงานที่เริ่มการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Pre-edge) ได้แก่ 6539.00 6551.48 และ 6554.88 ของตัวอย่างแมงกานีสมาตรฐาน ที่มีเลขออกซิเดชันเท่ากับศูนย์ (Mn foil) แมงกานีสที่มีเลขออกซิเดชันเท่ากับสาม (Mn₂O₃) และแมงกานีสที่มีเลขออกซิเดชันเท่ากับสี่ (MnO₂) ตามลำดับ และตำแหน่งพลังงานที่เริ่มการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 เท่ากับ 6553.99 eV แสดงการมีอยู่ของ Mn³⁺ และ Mn⁴⁺ นอกจากนี้การวิเคราะห์สัดส่วนของ Mn โดยใช้วิธี linear combination fit (LCF) เลือกโดย fitting ใน photon energy range -20 ถึง 30 eV ใช้สารมาตรฐานคือ Mn₂O₃ และ MnO₂ คำนวณโดย LCF เพื่อหาสัดส่วนปริมาณของเลขออกซิเดชันของ Mn ในสารตัวอย่าง ดำเนินการโดยโปรแกรม Athena ผลพิสูจน์ได้อย่างชัดเจนว่าการมีอยู่ของ Mn₂O₃ และ MnO₂ เท่ากับ 0.28 สัดส่วนโดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ไม่ผ่านการแคลไซน์ แสดงให้เห็นออกซิเดชันของ Mn³⁺ และ Mn⁴⁺ ดังนั้นออกซิเจนในโครงสร้างของ Mn₂O₃ และ MnO₂ ย่างต่อการออกซิไดซ์ไปเป็นออกซิเจนเรดิคัล มากกว่าแมงกานีสในรูปป้อน (Yodsa-nga et al., 2015) และมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงระหว่างออกซิเจนเรดิคัลกับสีย้อม ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นในปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน การศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของ

องค์ประกอบพื้นผิวและสถานะออกซิเดชันทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงดังรูป 2 (b) สเปกตรัม $Mn2p_{3/2}$ แสดงการเกิดขึ้น 2 พีคที่ 642.3 และ 643.6 eV และ $Mn2p_{1/2}$ แสดงค่าพลังงานพันธะประมาณ 654 และ 656 eV ซึ่งแสดงการมีอยู่ของ Mn^{3+} และ Mn^{4+} ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับงานวิจัยซึ่งยืนยันได้ว่าเป็นการมีอยู่ของ Mn^{3+} และ Mn^{4+} (Phanthasri et al., 2018)

2. ผลการย่อยสลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาคัลลายเพนตัน

การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายสีย้อม โดยนำชุดข้อมูลของค่าร้อยละการย่อยสลายสีย้อมที่เวลาการทำปฏิกิริยา 2 นาที เนื่องจากเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 5 นาที เป็นต้นไปสามารถย่อยสลายสีย้อมได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวแปรตอบสนอง เป็นร้อยละการย่อยสลายสีย้อมที่เวลาการทำปฏิกิริยา 2 นาที มาวิเคราะห์หาสมการควอดราติก (Quadratic equation) โดยทำการศึกษาพีเอช ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม) ความเข้มข้นเริ่มต้น PMS (มิลลิโมลาร์) ซึ่งการวิเคราะห์ได้กำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย (ค่าความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์)

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ค่าสัมประสิทธิ์	Pvalue
พีเอช	X_1	-3.53	0.03
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	X_2	17.47	<0.01
ความเข้มข้นเริ่มต้นเปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต	X_3	5.29	0.01
พีเอช*พีเอช	X_1^2	-8.55	<0.01
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	X_2^2	-11.92	<0.01
ความเข้มข้นเริ่มต้นเปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต*ความเข้มข้นเริ่มต้นเปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต	X_3^2	-6.59	0.01
พีเอช*ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	$X_1 X_2$	0.21	0.90
พีเอช*ความเข้มข้นเริ่มต้นเปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต	$X_1 X_3$	13.41	<0.01
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*ความเข้มข้นเริ่มต้นเปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต	$X_2 X_3$	-2.96	0.12

ผลสามารถวิเคราะห์ได้โดยพิจารณาปัจจัยใดบ้างที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการย่อยสลายสีย้อม โดยการพิจารณาจากค่า P (Pvalue < 0.05) เห็นว่าปัจจัยหลัก (Main effect term) ของ พีเอช ปัจจัยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น PMS ปัจจัยเทอมกำลังสอง (Square term) ของ พีเอช กับ พีเอช ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นเริ่มต้น PMS กับความเข้มข้นเริ่มต้น PMS และปัจจัยร่วม (Interaction effect term) ของ พีเอช กับความเข้มข้นเริ่มต้น PMS มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการย่อยสลายสีย้อม หากต้องการวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลมากที่สุด รวมถึงการเปรียบเทียบผลของแต่ละปัจจัยสามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยดังกล่าว เห็นได้ว่าผลของปัจจัยปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และผลของปัจจัยร่วม พีเอช กับความเข้มข้นเริ่มต้น PMS มีผลมากที่สุดต่อการย่อยสลายสีย้อม และสำหรับปัจจัยที่มีผลน้อยที่สุดคือปัจจัย พีเอช กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยร่วม พีเอช กับความเข้มข้นเริ่มต้น PMS และปัจจัยของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เห็นได้ว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลในเชิงบวกทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณของ PMS เริ่มต้น มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเพิ่มขึ้น เพื่อเป็นการวิเคราะห์ผลของปัจจัยดังกล่าวที่มีความถูกต้องมากขึ้น จึงได้นำค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 2 มาสร้างสมการ (สมการที่ 3) เพื่อทำนายผลของปัจจัยทั้งสามรวมถึงแนวโน้มของปัจจัยดังกล่าวที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมเทียบกับผลการทดลองพบว่าสมการที่ 3 สามารถนำมาคำนวณ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมจริงได้อย่างแม่นยำโดยยืนยันด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เข้าใกล้ 100 เปอร์เซนต์ ($R^2 = 98.83$ เปอร์เซนต์ และ R^2 (Adjusted) = 96.73 เปอร์เซนต์) นอกจากนี้สมการดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายสีย้อมให้ได้ค่าร้อยละในการย่อยสลายสีย้อมมีแอกทีฟ ที่สูงที่สุดได้อีกด้วย

$$Y = 90.38 - 3.53X_1 + 17.47X_2 + 5.29X_3 - 8.55X_1^2 - 11.92X_2^2 - 6.59X_3^2 + 0.21X_1X_2 + 13.42X_1X_3 - 2.97X_2X_3 \quad (3)$$

โดยที่ Y คือ ร้อยละการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120
X คือ ตัวแปรอิสระ (X_1 X_2 X_3 คือ ตัวแปร พีเอช ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นเริ่มต้นของ PMS ตามลำดับ)

การวิเคราะห์หาค่าความแม่นยำด้วย ANOVA โดยการวิเคราะห์จากค่า F-value แสดงดังตารางที่ 3 โดยค่า F-value ที่ได้ของปัจจัยที่มีค่าสูงกว่าค่า F-Critical สามารถอธิบายได้ว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลอย่างเป็นนัยสำคัญต่อการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120 พบว่า F-value ของเทอมเชิงเส้น (Linear term) เทอมกำลังสอง (Square term) และ เทอมปัจจัยร่วม (Interaction term) ของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการย่อยสลายสีข้อมีค่าเท่ากับ 107.13, 32.51 และ 43.87 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า F-Critical ($F_{(0.05, 3, 6)} = 4.76$) เทอมที่มีผลต่อค่าร้อยละการย่อยสลายสีข้อมีค่าเท่ากับเกือบทุกเทอมมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ($F\text{-value} > F\text{-Critical}$) ยกเว้นเทอมปัจจัยร่วมของพีเอชกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเทอมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับความเข้มข้นเริ่มต้นเปอร์ออกซิโมโนซัลเฟต ซึ่งมีค่า Fvalue เท่ากับ 0.02 และ 4.08 ตามลำดับ ส่วนค่า F-value ของ Lack-of-Fit มีค่าเท่ากับ 15.56 เมื่อเทียบกับค่า F-Critical ($F_{(0.05, 4, 2)} = 19.25$) พบว่า F-value มีค่าน้อยกว่า F-Critical และค่า P มีค่ามากกว่า 0.05 (0.061) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับผลการทดลองมีความแม่นยำโดยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแสดงผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ (Yodsa-nga et al., 2015) ทำให้สามารถนำสมการที่ 3 ไปวิเคราะห์และคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมได้ต่อไป

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) การย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120

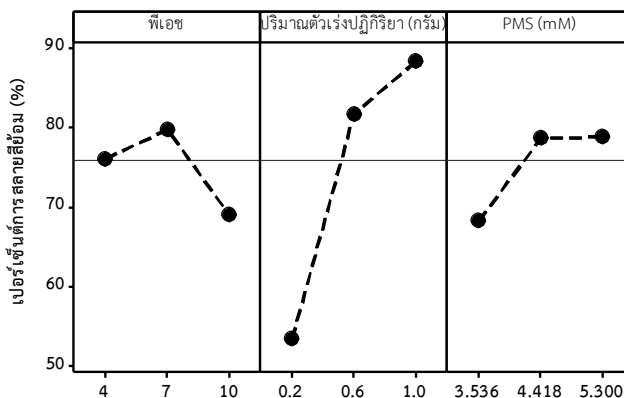
เทอม	จำนวน องศาอิสระ	F-value	ผล
Regression	8	63.33	มีนัยสำคัญ
เทอมปัจจัยเชิงเส้น	3	107.13	มีนัยสำคัญ
พีเอช	1	11.55	มีนัยสำคัญ
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	1	283.80	มีนัยสำคัญ
ความเข้มข้นเริ่มต้น PMS	1	26.05	มีนัยสำคัญ
เทอมปัจจัยกำลังสอง	3	32.51	มีนัยสำคัญ
พีเอช*พีเอช	1	31.36	มีนัยสำคัญ
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	1	60.96	มีนัยสำคัญ
ความเข้มข้นเริ่มต้น PMS *ความเข้มข้นเริ่มต้น PMS	1	18.65	มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) การย่อยสลาย
สีแดง เบอร์ 120 (ต่อ)

เทอม	จำนวน องศาอิสระ	F-value	ผล
เทอมปัจจัยรวม	3	43.87	มีนัยสำคัญ
พีเอช*ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	1	0.02	ไม่มีนัยสำคัญ
พีเอช*ความเข้มข้นเริ่มต้น PMS	1	83.66	มีนัยสำคัญ
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา*ความเข้มข้นเริ่มต้น PMS	1	4.08	ไม่มีนัยสำคัญ
Residual Error	6		
Lack-of-Fit	4	15.56	ไม่มีนัยสำคัญ
Pure Error	2		
Total	14		

การศึกษาผลของปัจจัยสำคัญ ได้แก่ พีเอช ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 และ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ PMS แสดงในรูปที่ 3 เห็นได้ว่าอัตราการย่อยสลายสีของเริ่มต้น เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อเพิ่มค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายจาก 4 ไปเป็น 7 แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มค่าพีเอชสูงเกิน 7 พบว่าความสามารถในการย่อยสลายสีของมีค่าลดลง ผลดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่าการทำปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 นั้นสามารถ ทำปฏิกิริยาได้ดีที่ค่าพีเอชที่เป็นกลาง ซึ่งเป็นข้อดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นหลักที่ทำ ปฏิกิริยาได้ดีในช่วงค่าพีเอชที่เป็นกรดเท่านั้น ในส่วนการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถยืนยันได้จาก ผลของค่า F-value ของปัจจัยปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงในตารางที่ 3 ในเทอมปัจจัย เชิงเส้น และเทอมปัจจัยกำลังสองมีค่า 283.80 และ 60.96 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่า F-Critical ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active sites) สามารถทำปฏิกิริยากับเปอร์ออกซิโมโนซัลเฟตและส่งผลให้สร้างเรดิคอลเพิ่มมากขึ้นในการ ทำปฏิกิริยาย่อยสลายสีของ นอกจากนี้แล้วการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถดูดซับ สีของบนพื้นผิวได้สูงขึ้น จึงสามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายสีของให้สูงขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามเพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมปัจจัยกำลังสองพบว่ามีค่าเป็นลบ (-11.92) แสดงในตารางที่ 2 หมายถึงการเพิ่มการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.6 กรัม ไปเป็น

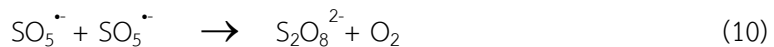
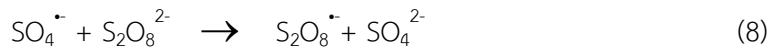
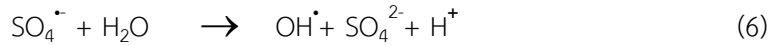
1.0 กรัม นั้น ประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อมลดลง เมื่อเทียบกับการเพิ่มปริมาณตัวเร่งจาก 0.2 กรัม ไปเป็น 0.6 กรัม นั้นเอง



รูปที่ 3 แนวโน้มของ พืเอช ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มข้นของ PMS

ต่อค่าร้อยละการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120

บทบาทของเปอร์ออกซิโมนโซลเฟตต่อความสามารถย่อยสลายสีย้อมงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของ PMS ที่แตกต่างกัน ผลการทดลองเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น 3.536 มิลลิโมลาร์ ไปสู่ 4.418 มิลลิโมลาร์ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญในเชิงบวก สามารถยืนยันผลจากค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 5.29 (ตารางที่ 2) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของซัลเฟตเรดิคอล สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4 – 6 เป็นการกระตุ้นของ เปอร์ออกซิโมนโซลเฟตโดยโลหะออกไซด์ (Luo et al., 2015) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเปอร์ออกซิโมนโซลเฟตมากขึ้น ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมไม่ได้เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงค่าเป็นลบเท่ากับ -6.59 (ตารางที่ 2) สาเหตุในการไม่เพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเกิดจากการลดลงของปริมาณเรดิคอล เกิดจากอัตราการเกิดของซัลเฟตเรดิคอลมากเกินไป จึงเกิดปฏิกิริยาการจำกัด (Scavenging) สามารถอธิบายได้สมการที่ 7 – 10 ส่งผลทำให้ปริมาณของซัลเฟตเรดิคอลไม่ได้สูงขึ้นตามความเข้มข้นของเปอร์ออกซิโมนโซลเฟต (Li et al., 2018) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมไม่เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของเปอร์ออกซิโมนโซลเฟตมากเกินไป



สุดท้ายนี้ได้ทำการคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimal condition) ในการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120 โดยมีเป้าหมายสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมสูงสุด ซึ่งผลร้อยละการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120 สูงสุดเท่ากับ 97.16 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะในการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120 ค่าพีเอชเริ่มต้น 6.67 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.889 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นของ PMS 4.53 มิลลิโมลาร์ เมื่อทำการทดลองซ้ำที่สภาวะดังกล่าวจำนวน 3 ซ้ำ ได้ค่าร้อยละการย่อยสลายสีย้อมแอกทิฟเรด 120 เท่ากับ 97.86, 97.93, 98.13 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยการย่อยสลายสีย้อมเท่ากับ 97.97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่าค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2 แสดงให้เห็นว่าสมการนี้ สามารถใช้ในการคำนวณผลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ งานวิจัยนี้สามารถยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120 แบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) ที่มีเปอร์ออกซิโมโนซัลเฟตร่วมทำปฏิกิริยาในการกำจัดสีแดง เบอร์ 120 ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นตัน สามารถย่อยสลายสีย้อมได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเพียง 2 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ K-OMS-2 และศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีแดง เบอร์ 120 กับผลของปัจจัยอิสระ ได้แก่ พีเอช ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และ ความเข้มข้นของ PMS ที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อม พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 สามารถสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยไม่ผ่านการแคลไซน์ และตัวเร่งปฏิกิริยา K-OMS-2 มีประสิทธิภาพสูง

ในการย่อยสลายสีแดง เบอร์ 120 ในสภาวะที่เป็นกลาง การออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นกิน (Box-Behn design, BBD) ศึกษาผลของปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วม พบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมสูงที่สุด รองลงมาคือความเข้มข้นเริ่มต้นของ PMS และเมื่อคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสม ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีแดง เบอร์ 120 เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.67 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.78 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของ PMS 4.53 มิลลิโมลาร์ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมมีค่าเท่ากับ 97.97 เปอร์เซ็นต์

เอกสารอ้างอิง

- Doumic, L. I., Haure, P. M., Cassanello, M. C., & Ayude, M. A. (2013). Mineralization and efficiency in the homogeneous Fenton Orange G oxidation. *Appl. Catal. B Environ.*, 142–143, 214–221.
- Gomathi, D. L., Girish, K. S., Mohan, R. K., & Munikrishnappa, C. (2009). Photo degradation of Methyl Orange an azo dye by Advanced Fenton Process using zero valent metallic iron. *J. Hazard. Mater.*, 164(2–3), 459–467.
- Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Nat. Sci.*, 4(1), 22–26.
- Kondru, A. K., Kumar, P., & Chand, S. (2009). Catalytic wet peroxide oxidation of azo dye (Congo red) using modified Y zeolite as catalyst. *J. Hazard. Mater.*, 166(1), 342–347.
- Kumari, S., Mankotia, D., & Chauhan, G. S. (2016). Crosslinked cellulose dialdehyde for Congo red removal from its aqueous solutions. *J. Environ. Chem. Eng.*, 4(1), 1126–1136.
- Li, J., Xu, M., Yao, G., & Lai, B. (2018). Enhancement of the degradation of atrazine through CoFe_2O_4 activated peroxymonosulfate (PMS) process: kinetic, degradation intermediates, and toxicity evaluation. *Chem. Eng J.*, 348, 1012–1024.

- Luo, S., Duan, L., Sun, B., Wei, M., Li, X., & Xu, A. (2015). Manganese oxide octahedral molecular sieve (OMS-2) as an effective catalyst for degradation of organic dyes in aqueous solutions in the presence of peroxymonosulfate. *Appl. Catal. B Environ.*, 164, 92–99.
- Phanthasri, J., Khamdahsag, P., Jutaporn, P., Sorachoti, K., Wantala, K., & Tanboonchuy, V. (2018). Enhancement of arsenite removal using manganese oxide coupled with iron (III) trimesic. *Appl. Surf. Sci.*, 427, 545–552.
- Saputra, E., Muhammad, S., Sun, H., Patel, A., Shukla, P., Zhu, Z.H., & Wang S. (2012). α -MnO₂ activation of peroxymonosulfate for catalytic phenol degradation in aqueous solutions. *CATCOM*, 26, 144–148.
- Tehrani-Bagha, A. R., Gharagozlou, M., & Emami, F. (2016). Catalytic wet peroxide oxidation of a reactive dye by magnetic copper ferrite nanoparticles. *J. Environ. Chem. Eng.*, 4(2), 1530–1536.
- Ye, P., Zou, Q., An, L., Wei, Y., Xu, A., & Li, X. (2019). Room-temperature synthesis of OMS-2 hybrids as highly efficient catalysts for pollutant degradation via peroxymonosulfate activation. *J. Colloid Interface Sci.*, 535, 481–490.
- Yodsa-nga, A., Millanar, J. M., Neramittagapong, A., Khemthong, P., & Wantala, K. (2015). Effect of manganese oxidative species in as-synthesized K-OMS 2 on the oxidation of benzene. *Surf. Coat Tech.*, 271, 217–224.
- Youssef, N. A., Shaban, S. A., Ibrahim, F. A., & Mahmoud, A. S. (2016). Degradation of methyl orange using Fenton catalytic reaction. *Egypt. J. Pet.*, 25(3), 317–321.